Особенности проектирования одномодовых волоконно-оптических линий связи

В статье рассматриваются особенности проектирования одномодовых волоконно-оптических линий связи. Приводятся примеры расчетов.

ЗАО "СКН", г. Санкт-Петербург

Оптические технологии с каждым днем завоевывают новые позиции в нашей жизни. Устройства, удостоенные в недавнем прошлом Нобелевской премии, можно встретить сейчас в каждом доме. Сейчас никого не удивишь терминами "оптический бюджет", "затухание в окне прозрачности", "спектральное мультиплексирование".

Да и на практике многие уже научились проводить минимум необходимых расчетов при проектировании волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Однако отрасли еще далеко до телекоммуникаций, где правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС приобрели форму нормативных документов.

В частности, вопросы проектирования одномодовых ВОЛС еще не нашли достаточного освещения на страницах периодических изданий. В данной публикации мы постараемся обратить внимание проектировщиков и пользователей на те узкие места, с которыми нам уже пришлось столкнуться при выполнении ряда практических работ. В силу специфики излагаемого материала мы уделим большое внимание терминологии, поскольку еще Рене Декарт сказал: "Верно определяйте слова, и вы освободите мир от половины недоразумений".

Известно, что в одномодовых ВОЛС применяются цифровые методы передачи информации. Основным критерием качества любой цифровой линии связи является достоверность передачи информации, которая оценивается интенсивностью битовых ошибок BER (Bit Error Rate). BER определяется как отношение неправильно принятых бит информации к полному числу передаваемых бит и на практике не должна превышать 10^{-9}. В реальных ВОЛС значение BER определяется энергетическими параметрами (оптический бюджет) и широкополосностью линии (величина дисперсии).

Энергетический бюджет *Э* волокон по оптической линии связи определяется следующим образом:

$$Э = 10\lg(P_{опт}/S_{пор}), \qquad (1)$$

где $P_{опт}$ — выходная мощность передатчика;

$S_{пор}$ — чувствительность приемника.

Единицей измерения этих величин является дБм — выраженная в логарифмических единицах мощность относительно уровня в 1 милливатт. Стремление разработчика обеспечить максимальную величину *Э* в простейшем случае может быть достигнуто выбором пары передатчик/приемник с максимальными значениями выходной мощности и пороговой чувствительности. Однако на практике необходимо принимать во внимание соображения экономической целесообразности: цены на модели передатчиков и приемников с ростом $P_{опт}$ и $S_{пор}$ значительно возрастают. Кроме того, стремление использовать приемник с необоснованно высокой чувствительностью в реальных условиях эксплуатации за счет воздействия внешних помех может привести к возбуждению, ложным срабатываниям и, соответственно, снижению BER.

Очевидно, что энергетический бюджет ВОЛС должен превосходить сумму потерь на пути передачи сигнала от передатчика к оптическому приемнику, включая некоторый запас мощности. Определение этого запаса — одна из наиболее важных задач при проектировании ВОЛС.

При этом необходимо учитывать следующие факторы:

- ВОЛС с цифровыми методами передачи информации критичны к изменению отношения сигнал/шум, и незначительное его ухудшение может привести к существенному снижению BER;
- мощность оптического пе-

редатчика падает с течением времени;

- увеличение физической нагрузки на кабель приводит к возрастанию потерь в нем.

Поэтому запас мощности для одномодовых ВОЛС должен превышать аналогичный параметр для аналоговых многомодовых линий связи. Как правило, он составляет 6 дБ – по 3 дБ эксплуатационного запаса для активных и пассивных компонентов соответственно.

Лучшие образцы одномодового волокна имеют очень малое затухание светового сигнала – порядка 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. Энергетический расчет одномодовой ВОЛС показывает, что на существующей аппаратуре возможно построение линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Однако энергетический расчет не учитывает явления дисперсии – уширения длительности оптического импульса по мере его распространения по оптоволокну. Длительность полученных приемником импульсов не должна превышать битовый интервал, который связан со скоростью передачи сигналов (битрейтом) B_0 соотношением:

$$T_0 = 1/B_0. \qquad (2)$$

Если это условие не будет соблюдаться, то произойдет наложение соседних импульсов друг на друга, приемник не сможет их распознать и в результате увеличится BER. Для того чтобы при передаче сигнала сохранялось требуемое значение BER, необходимо, чтобы полоса пропускания волокна на длине волны передачи превосходила частоту модуляции оптического сигнала. На практике полоса пропускания одномодовой ВОЛС должна вдвое превосходить битрейт, поскольку в цифровых оптических передатчиках используются различные виды модуляции – модуляция без возвращения к нулю (NRZ) и с возвращением к нулю (RZ). Отличие заключается в том, что в NRZ-формате импульс, обозначающий 1, занимает весь выделенный для ее передачи период, а в RZ-формате – только некоторую часть периода, например 50%. Производители, как правило, не указывают вид модуляции в спецификациях на аппаратуру, и запас по полосе пропускания будет гарантировать вам ее корректную работу.

В силу фундаментальных ограничений, которые вносит в характеристики ВОЛС явление дисперсии, остановимся на нем более подробно. Уширение световых импульсов вызвано различием времени распространения спектральных и поляризационных компонент светового сигнала (хроматическая и поляризационная модовая дисперсия). Хроматическая дисперсия обусловлена как свойствами световода (материальная дисперсия), так и свойствами источника света (межчастотная дисперсия). В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{mat} = (\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda);$$
$$\tau_{w} = (\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda),$$

где введены коэффициенты: $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$ – удельные материальная и межчастотная дисперсии соответственно, а λ (нм) – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения.

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как

$$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda),$$

и тогда

$$\tau_{chr} = \Delta\lambda \cdot L \cdot D(\lambda). \qquad (3)$$

Удельная дисперсия имеет размерность пс/нм · км. Если коэффициент межчастотной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. Необходимо подчеркнуть, что при определенной длине волны (примерно 1310 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в нуль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0. Для конкретного типа волокна обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0.

Поляризационная модовая дисперсия τ_{pmd} возникает в случае использования источников света с очень узкой спектральной полосой излучения вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды. Коэффициент удельной поляризационной модовой дисперсии T нормируется в расчете на 1 км и имеет размерность (пс/км$^{1/2}$), а τ_{pmd} растет с расстоянием по закону

$$\tau_{pmd} = T \cdot L^{1/2}. \qquad (4)$$

Типичные значения τ_{pmd} для современных волокон лежат в пределах 0,1-0,2 пс/км$^{1/2}$, хотя во многих ранее проложенных и использующихся линиях связи величина коэффициента ПМД оптического волокна превышает 1 пс/км$^{1/2}$ и может доходить до 10 пс/км$^{1/2}$. Особенностями поляризационной модовой дисперсии являются ее случайный характер от длины волны и зависимость от окружающей температуры. С учетом стохастического характера ПМД в практических приложениях целесообразно исходить из условия $\tau_{pmd} < 0,1/B_0$. В случае передачи широкополосного сигнала с битрейтом 1 Гбит/с и выше поляризационная модовая дисперсия может стать сравнимой с хроматической дисперсией. Оценить расстояние L_0, при котором хроматическая τ_{chr} и поляризационная модовая дисперсии τ_{pmd} сравниваются по величине, можно, приравнивая выражения (3) и (4):

$L_0 = (T/\Delta\lambda \cdot D(\lambda))^2$.

При $L > L_0$ поляризационной модовой дисперсией можно пренебречь, при $L < L_0$, наоборот, ее следует строго учитывать. Результирующая дисперсия определяется из соотношения (5):

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2_{chr} + \tau^2_{PMD}} \quad (5)$$

С точки зрения дисперсии, существующие одномодовые волокна разбиваются на три основных типа: волокна с несмещенной дисперсией SF, волокна со смещенной дисперсией DSF и волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF.

Все три типа волокон очень близки по затуханию в окнах 1310 и 1550 нм, но отличаются характеристиками хроматической дисперсии. Поскольку дисперсия влияет на максимальную длину ВОЛС, то возникает желание выбрать волокно с наименьшим возможным значением дисперсии применительно к конкретной задаче и к конкретной длине волны. Технология грубого спектрального мультиплексирования в диапазоне от 1470 до 1610 нм (CWDM) диктует иной подход к выбору транспортной среды. Исследования показывают, что когда длина волны нулевой дисперсии попадает в зону мультиплексного сигнала, начинают проявляться нежелательные интерференционные эффекты, приводящие к быстрой деградации сигнала. Поэтому проектировщики ВОЛС должны отчетливо представлять себе преимущества и недостатки каждого типа волокна.

Одномодовый режим в ступенчатом одномодовом волокне SF с диаметром светонесущей жилы 8 мкм (рекомендация Международного Союза Электросвязи (ITU) G.652) реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности – потери в нем составляют 0,3-0,4 дБ/км, а наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм. В одномодовом волокне со смещенной дисперсией DSF (рекомендация ITU G.653) длина волны нулевой дисперсии 0 смещена в окно 1550 нм. В таком волокне реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому DSF-волокно лучше подходит для создания протяженных (до 100 км) ВОЛС. Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (рекомендация ITU G.655), в отличие от DSF, оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн, и наиболее эффективно может использоваться при построении сетей со спектральным мультиплексированием.

Пример расчета №1

Предположим, что перед нами стоит задача передачи 8 видеосигналов, сопровождаемых RS-данными по одному волокну, на расстояние 40 км. Выбираем комплект из передатчика и приемника серии CFO 851 производства компании “Teleste” с заявленной максимальной дальностью передачи 60 км.

При расчете брались следующие технические характеристики передатчика и ВОЛС:

- протяженность ВОЛС: $L = 40$ км;
- количество неразъемных соединений: $n_{нс} = 15$;
- километрическое затухание в оптическом волокне: $\alpha = 0,2$ дБ/км;
- количество разъемных соединений: $n_{рс} = 4$;
- потери на неразъемных соединениях: $A_{нс} = 0,05$ дБ;
- потери на разъемных соединениях: $A_{рс} = 0,2$ дБ;
- эксплуатационный запас для аппаратуры: $A_{эза} = 3$ дБ;
- эксплуатационный запас для кабеля: $A_{эзк} = 3$ дБ;
- мощность передатчика: $P_{опт} = +2$ дБм;
- чувствительность приемника: $S_{пор} = 15$ дБм;
- рабочая длина волны: $\lambda = 1,55$ мкм;
- максимальная ширина спектра излучения источника: $\lambda = 1$ нм;
- скорость передачи $B_0 = 1,08$ Гбит/с.

Предположим, что сначала проектировщик остановил свой выбор на SF-кабеле со следующими характеристиками:

- удельная хроматическая дисперсия $D(\lambda = 1550 \text{ нм}) = 17,5$ пс/нм · км;
- коэффициент поляризационной модовой дисперсии: $T = 0,5$ пс/км$^{1/2}$.

Для нормального функционирования ВОЛС необходимо, чтобы длительность импульса τ_L на входе приемника не превышала исходный битовый интервал при его мощности, равной чувствительности приемника $S_{пор}$. Рассчитаем значение хроматической дисперсии из выражения (3):

$$\tau_{chrmax}(\lambda) = D(\lambda) = 17,5 \cdot 1 \cdot 40 = 700 \text{ пс}$$

Поляризационная модовая дисперсия рассчитывается из выражения (4):

$$\tau_{pmd} = T \cdot L^{1/2} = 0,5 = 3,16 \text{ пс.}$$

Результирующая дисперсия будет определяться из следующего выражения [5]:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2_{chr} + \tau^2_{PMD}} = $$
$$= \sqrt{(700)^2 + (3,16)^2} \approx \tau_{chr} = 700 \text{пс.}$$

Поскольку битовый интервал $T_0 = 1/B_0$, получим $T_0 = 943$ пс.

Максимально допустимая величина уширения импульсов определяется из условия, что при скорости передачи B_0=1,08 Мбит/с допустимая длительность импульса $\tau = T_0/2 = 471$ пс . Начальная длительность импульсов определяется из выражения $\tau = T_0/4 = 235$ нс. Конечная длительность импульса выражается через его начальную длитель-

ность τ_0 следующим соотношением:

$$\tau = \sqrt{\tau^2_0 + \tau^2_{рез}} = \sqrt{(700)^2 + (3{,}16)^2} \approx \tau_{chr} = 700 пс.$$

Т.е. при скорости передачи B_0 = 1,08 Гбит/с длительность оптического импульса, уширенного вследствие дисперсии, превосходит допустимую величину τ = 471 пс. Поэтому для нормальной работы ВОЛС необходимо компенсировать хроматическую дисперсию, например, выбрать DSF-кабель с удельной хроматической дисперсией $D(\lambda) < 1{,}7$ пс/ нм · км.

В этом случае уширение длительности импульса на длине волны 1550 нм будет в 10 раз меньше и не окажет существенного влияния на конечную длительность импульса, и, как следствие, на величину BER.

При расчете энергетического бюджета затухание ВОЛС рассчитывается по формуле:

$$A = A_{нс} \cdot n_{нс} + \alpha \cdot L + A_{рс} \cdot n_{рс} = 0{,}05 \cdot 15 + 0{,}2 \cdot 40 + 0{,}2 \cdot 4 = 9{,}55 \text{ дБ}.$$

Тогда фактический энергетический бюджет будет равен:

$$Э = P_{опт} \cdot H_{пор} - A_{эза} - A_{эзк} - A = + 2 - (-15) - 3 - 3 - 9{,}55 = 1{,}45 дБ$$

Полученное значение затухания волоконно-оптической линии находится в пределах допустимых значений, т.к. рассчитанный энергетический бюджет получился положительным.

Пример расчета №2

Выше было указано, что для передачи сигнала с приемлемым качеством необходимо, чтобы полоса пропускания волокна на длине волны передачи превосходила частоту модуляции. При расчете полосы пропускания W одномодового волокна можно пользоваться формулой

$$W = 0{,}44 / \tau_{рез}.$$

Физический смысл W – это максимальная частота модуляции передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания обратно пропорционально зависит от расстояния и измеряется в МГц*км. Например, при λ = 2 нм для волокна SF полоса пропускания на длине волны 1310 нм превосходит 120 000 Мгц*км и уменьшается в 10 раз при переходе на длину волны 1550 нм. Обратная картина наблюдается у волокна DSF – максимальная полоса пропускания на длине волны 1550 нм в 10 раз больше полосы пропускания на длине волны 1310 нм. Так, для того же комплекта передатчик/приемник серии 851 и дальности передачи 40 км полоса пропускания SF-волокна составляет 315 Мгц, чего явно недостаточно для передачи сигнала с битрейтом 1,08 ГГц. Исправить ситуацию можно, если использовать для передачи волокно со смещенной дисперсией DSF. Если же кабельная система на объекте представлена исключительно одномодовыми волокнами со ступенчатым профилем (SF), то следует существенно ограничить дальность передачи по сравнению с паспортным значением.

В.В. Никитин, М.А. Ефимов, А.Я. Рывкин,
ЗАО "СКН", г. Санкт-Петербург,
тел.: (812) 234-98-11,
E-mail: skn@skn-spb.ru

АСУ ТП литейного цеха на заводе «АЛНАС»

Введена в эксплуатацию система управления смесеприготовительного отделения формовочных линий "А" и "В" литейного цеха завода "Алнас", г. Альметьевск.

АСУ ТП приготовления формовочной земли для литейного цеха осуществляет управление и контроль 15 конвейерами, 8 шнеками, весовыми дозаторами, вентиляцией, пневматическими пушками и другими исполнительными механизмами.

Разработчик системы, ЗАО "Электронмаш" (г. Санкт-Петербург), выбрал для ее реализации оборудование Siemens (контроллер Simatik S7-300, весовые модули SIWAREX, блоки расширения IM360 и IM361 с модулями ввода-вывода SM 322 и SM 321) и SCADA-систему Master SCADA. Кроме АРМа оператора-земледела для задания параметров смеси используется панель Simatic OP270. Связь между контроллером, АРМ и панелью осуществляется с помощью полевой шины Profibus-DP. АРМ подключается к шине через адаптер CP-5611. Для связи Master SCADA и контроллера используется Simatic.NET OPC сервер.

Одним из требований заказчика к системе управления было минимальное время простоя при переходе от старой системы управления к новой. Для обеспечения этого требования были разработаны переходные платы, обеспечившие переключение на новую систему управления всего за 20 минут.